بررسی تجربی تأثیر پارامترهای لیزر در شکل‌دهی ورق‌های فوم حفره‌بستهٔ آلومینیم با استفاده از لیزر*

امیرحسین روحی[۱] حسن مسلمی نائینی[۲] محمد حسین‌پور گللو[۳] مهدی سلطان‌پور[٤]

چکیده *در فرآیند شکل‌دهی با لیزر تشکیل گرادیان دمایی در راستای ضخامت ورق عامل ایجاد خم نهایی می‌باشد. ورق‌های فوم فلزی، به‌علت بروز شکست در حین تغییرشکل، توسط هیچ‌کدام از روش‌های مکانیکی قابل شکل‌دهی نمی‌باشد. در این مقاله، ورق‌های فوم حفره‌بستهٔ آلومینیم تحت تابش لیزر قرار گرفته است. آزمایش‌ها با مقادیر متفاوت توان لیزر، سرعت پرتو و تعداد پاس‌های اسکن انجام گرفته است تا تأثیر هر کدام روی مقدار نهایی خم تعیین گردد. از طراحی آزمایش به‌شیوهٔ رویهٔ پاسخ و تحلیل واریانس نتایج به‌منظور تعیین تأثیر پارامترهای فرآیندی استفاده شده است. درانتها، رابطه‌ای برای پیش‌بینی مقدار زاویهٔ خم در ورق فوم ارائه شده است.*

واژه‌های کلیدی فرآیند شکل‌دهی با لیزر، فوم حفره‌بسته آلومینیم، طراحی آزمایش.

Experimental Investigation on Process Parameters Effects in Laser Forming of Closed-cell Aluminium Foam Sheets

A.H. Roohi H. Moslemi Naeini M. Hoseinpour Gollo M. Soltanpour

Abstract *In a laser forming process, the temperature gradient across the sheet thickness produces the final bending angle. Metallic foams cannot be formed by any mechanical processes due to occurrence of failure during deformation. In this article, closed-cell aluminium foams are irradiated by a laser beam. Experiments are carried out by varying laser power, scan velocity and the number of scan passes to specify their effect on the bending angle. Design of experiment with the response surface methodology and analysis of variance are utilized to analyze parameter effects. At last, an equation is derived for prediction of bending angle.*

Key Words Laser forming process, Closed-cell aluminium foam, Design of experiment.

★تاریخ دریافت مقاله ۹۳/٦/۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۰/۳ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری تخصصی، گروه ساخت و تولید، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس.

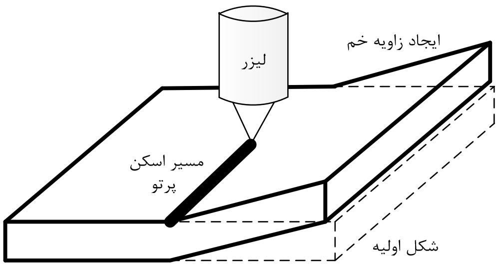
(۲) نویسندهٔ مسئول، استاد، گروه ساخت و تولید، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس.moslemi@modares.ac.ir

(۳) استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

(٤) استادیار، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره).

مقدمه

فرآیند شکل‌دهی با استفاده از لیزر به‌طور شماتیک در شکل (۱) آورده شده است. در این فرآیند، قطعه‌کار تحت تابش پرتو لیزر، که با سرعت مشخص در سطح آن حرکت می‌کند، قرار می‌گیرد. در اثر ایجاد یک گرادیان دمایی در راستای ضخامت قطعه، تنش‌های حرارتی القا می‌شود که به ایجاد تغییرشکل پلاستیکی در ناحیهٔ حرارت‌دیده می‌انجامد. پس از عبور لیزر، دمای قطعه پایین می‌آید و یک زاویهٔ خم دائمی ایجاد می‌شود. تکرار تابش پرتو لیزر باعث افزایش زاویهٔ خم می‌گردد [1].



شکل ۱ نمونه‌ای از فرآیند شکل‌دهی با استفاده از پرتو لیزر

فرآیند شکل‌دهی با لیزر در سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. گیگر و ولرتسن [2] سه مکانیزم اصلی شکل‌دهی با لیزر را شامل مکانیزم گرادیان دمایی، مکانیزم خمش کمانشی و مکانیزم کوتاه‌کردن معرفی کرده‌اند. شیچون و جین‌سونگ [3] کلیه پارامترهای مؤثر بر شکل‌دهی نهایی ورق‌های فلزی را به سه دستهٔ پارامترهای انرژی لیزر، پارامترهای جنس ماده و پارامترهای هندسی ورق تقسیم‌بندی نموده‌اند. گوان‌یانجین و همکارانش [4] مدلی را توسعه داده‌اند که تأثیر مشخصه‌های ماده نظیر مدول یانگ، استحکام تسلیم، ضریب انبساط حرارتی، گرمای ویژهٔ ماده و ضریب رسانایی حرارتی را بر فرآیند شکل‌دهی با لیزر تعیین می‌نماید. جمیل و همکارانش [5] به‌طریق عددی، تأثیر انواع مختلف هندسه‌ی مستطیلی پرتو لیزر بر مشخصه‌های نهایی محصول را بررسی نموده‌اند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که هرچه طول سطح مقطع پرتو در راستای اسکن بزرگ‌تر باشد، میزان تغییرشکل افزایش می‌یابد. ادورادسن و همکارانش [6] به بررسی فرآیند شکل‌دهی دوبعدی چندپاسه با استفاده از لیزر پرداخته‌اند. در آن مطالعه نشان داده شده است که کرنش‌سختی، افزایش ضخامت سطح، تغییرات ضریب جذب پرتو و مشخصه‌های هندسی پرتو عواملی هستند که بر میزان زاویهٔ خمش به‌دست آمده در هر پاس تأثیرگذار است. جین چنگ و همکارانش [7] تأثیر سرمایش اجباری بر افزایش زاویهٔ خمش حاصل در فرآیندهای چندپاسه را بررسی کردند. پنگ‌چنگ و همکارانش [8] شرایط فرآیندی در شکل‌دهی با لیزر ورق‌هایی را که دارای سطح‌مقطع متغیر در راستای مسیر اسکن هستند مطالعه کرده‌اند. گذار مکانیزم‌های مختلف سه‌گانه به یکدیگر به‌ازای تغییرات سطح‌مقطع در طول این بررسی مشاهده شده است. حسین‌پور گللو و همکارانش [9] به بررسی تأثیر پارامترهای فرآیندی، شامل مشخصه‌های ماده، قطر پرتو و طول زمان پالس بر میزان شکل‌دهی روی ورق‌های فولادی St12 و آلیاژ AISI 304 با استفاده از لیزر Nd:YAG، به‌روش طراحی آزمایش تاگوچی، پرداخته‌اند. شن و همکارانش [10] چگونگی تغییرات مشخصه‌های مکانیکی ورق‌های فولاد کم‌کربن را پس از تابش پرتو لیزر نشان داده‌اند. نتایج تجربی آنها بیان می‌کند که پس از فرآیند شکل‌دهی با لیزر، استحکام تسلیم و استحکام نهایی بهبود، و درصد افزایش‌طول شکست قطعات کاهش یافته است. فرآیند شکل‌دهی با لیزر مواد شکننده، شامل سیلیکون‌های تک‌کریستالی، شیشهٔ بروسیلیکات و سرامیک Al2O3 با تابش دو نوع لیزر حالت گاز CO2 و لیزر حالت جامد Nd:YAG توسط دانگ‌جیانگ‌وو و همکارانش [11] انجام گرفته است.

نتـایج ایـن تحقیـق نشـان مـی‌دهـد کـه اعمـال درجه‌حـرارت‌هـای بـالا مـانع از بـروز شکسـت تـرد می‌گردد و هم‌چنین انتخاب دقیق و مناسب پارامترهای فرآیندی برای دست‌یابی به زاویهٔ خمش در ایـن دسـته از مواد ضروری اسـت. شـی و همکـارانش [12] یـک روش حرارت‌دهی نوین برای شـکل‌دهـی دقـت‌بـالای صفحه‌هـای فلـزی تحـت مکـانیزم کوتـاه‌کـردن ارائـه کرده‌اند. نتیجه آن‌کـه هرچـه قطـر پرتـو کوچـک‌تـر و سرعت اسـکن لیـزر بـالاتر باشـد، امکـان تـابش‌دهـی هم‌زمان سطوح بالایی و پایینی ورق و دسـت‌یـابی بـه شکل‌دهی دقیق فراهم می‌گردد. یـانجین و همکـارانش [13] اثر زاویهٔ پرتو تابشی را، که بر میزان جـذب پرتـو لیزر تأثیرگذار است، برای کنترل زوایای خم بـه‌دسـت آمده از فرآیند، مطالعه نموده‌اند. نتیجهٔ آن مطالعه نشـان می‌دهد که با افزایش زاویهٔ تابشی از ٦٠ بـه ٨٠ درجـه، مقدار نهایی شکل‌دهی نیـز افـزایش مـی‌یابـد. قـدیری زهرانی و همکارانش [14] به بررسـی پدیـده‌هـای اثـر لبـه‌ای و اعوجـاج طـولی حـین شـکل‌دهـی بـا لیـزر پرداخته‌اند. آن‌ها نشان داده‌انـد کـه بـا افـزایش تعـداد پاس‌های اسکن، ضخامت ورق، سرعت اسکن و تـوان لیزر میزان اثرات لبه‌ای کاهش یافته اسـت. هـم‌چنـین، افزایش ضخامت ورق، سرعت اسکن و تعداد پـاس‌هـا می‌تواند به کاهش اعوجاج لبه‌ای منجـر شـود. فرآینـد خم‌کاری با لیزر ورق‌های آلیاژ فـولاد ضـدزنگ AISI 304 توسط ماجی و همکارانش [15] بررسـی گردیـده است. در نتیجه‌ی این تحقیق، مقادیر بهینـهٔ پارامترهـای فرآیندی به‌منظور دست‌یابی به بیشینهٔ زاویهٔ خمـش در ایـن دسـته از ورق‌هـا تعیـین شـده اسـت. صـفری و همکارانش [16] به بررسی شکل‌دهی با لیزر ورق‌هـای ماشین‌کاری شدهٔ تیلور (TMB) پرداخته‌اند. با توجه بـه تغییرات گسستهٔ ضخامت در این ورق‌ها، خم‌کـاری بـا لیزر آن‌ها در مقایسه با ورق‌های یکنواخـت پیچیـده‌تـر می‌باشد. بنابراین، اعمال یـک طـرح موسـوم بـه روش بهبودیافتـهٔ سـرعت مـی‌توانـد باعـث دسـت‌یـابی بـه شکل‌دهی یکنواخت‌تر این ورق‌ها گردد.

عـلاوه‌بـراین، پـژوهش‌هـای معـدودی در زمینـهٔ شکل‌دهی ورق‌های آلومینیم و آلیاژهای آن شده اسـت. مرکلین و همکـارانش [17] بـه بررسـی میکروسـاختار ورق‌های آلومینیم پـس از اعمـال شـکل‌دهـی بـا لیـزر پرداخته‌اند. تغییرات مشخصه‌های مکانیکی آلـومینیم در این بررسی مورد توجه قـرار گرفتـه اسـت. لابیـز [18] یک مدل عددی برای شبیه‌سـازی شـکل‌دهـی بـا لیـزر ورق‌های آلومینیم توسعه داده اسـت. در ایـن مـدل، از یک روش تحلیل هم‌زمان ساختاری-حرارتی به‌منظـور شبیه‌سازی فرآینـد اسـتفاده شـده اسـت. یـوان کـین و همکارانش [19] از یـک مـدل ریاضـی بـرای بررسـی حرارت‌دهی ورق‌های Al2024 توسط لیزر ND:YAG استفاده کرده‌اند. این مدل، یـک شکسـت پلاسـتیک در لایه‌های بالاتر ورق آلومینیمی را پیش‌بینی می‌کند. ناپفر و همکـارانش [20] بـه بررسـی تـأثیر تـابش لیـزر بـر مشخصه‌های مکانیکی و متالورژیکی آلیاژهای آلـومینیم پرداخته‌اند. روحی و همکارانش [21] تأثیر اعمال یـک نیروی مکانیکی کمکی در کنار تابش پرتو لیزر به‌منظور دست‌یابی به زوایای خم بالا در ورق‌هـای آلـومینیم را مورد مطالعه قرار داده‌انـد. نتیجـهٔ ایـن پـژوهش نشـان می‌دهد که اعمال نیروی کمکی می‌تواند تا یک‌سوم بـه افزایش شکل‌دهی نهایی ورق بیانجامد.

ورق‌های فوم فلزی دستهٔ جدیدی از مواد است که به‌خصوص در دهه‌های اخیر، بـه‌علـت مشخصـه‌هـای مناسب فیزیکی و مکانیکی نظیر چگالی پایین، هم‌زمان سفتی بالا و ویژگی‌های حرارتی مناسـب مـورد توجـه قرار گرفته است [22]. از این مواد در ساخت سازه‌های سبک و هم‌چنین جذب‌کنندهٔ انرژی استفاده مـی‌گـردد. فوم‌های فلزی، به‌ویژه فوم‌های آلومینیم، به‌طور گسترده در صنایع خودروسازی، دفاعی و هواوفضا کاربرد دارد [23]. در زمینهٔ شکل‌دهی با لیزر ورق‌های فـوم فلـزی، یک مطالعه توسط کوادرینی و همکـارانش [24] انجـام شده است. در این مطالعـه، از لیـزر دیـودی بـه‌منظـور

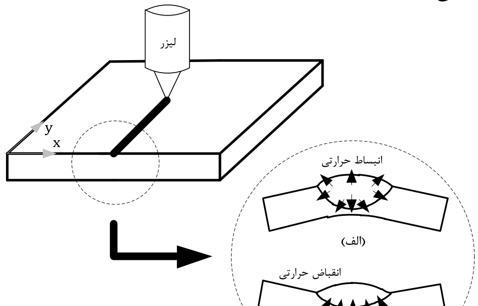
خم‌کردن فوم‌های حفره‌باز آلومینیم با چگالی‌های مختلف استفاده شده است.

در مقالهٔ حاضر، فوم‌های حفره‌بستهٔ آلومینیم، که به‌کمک هیچ‌کدام از روش‌های شکل‌دهی مکانیکی قابلیت شکل‌دهی ندارد، با اعمال پرتو لیزر مورد شکل‌دهی قرار گرفته است. هم‌چنین تأثیر سه پارامتر توان لیزر، سرعت اسکن پرتو و تعداد پاس‌های اسکن بررسی شده است. به‌منظور تعیین دقیق تأثیر پارامترهای اشاره‌شده روی زاویهٔ خم نهایی در ورق‌های فوم حفره‌بسته آلومینیم از روش آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شده است. هم‌چنین از روش طراحی آزمایش به شیوهٔ رویهٔ پاسخ (RSM) به‌منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها بهره گرفته شده است. تعداد ۲۰ آزمایش بر روی ورق‌های فوم آلومینیم انجام شده است و درنهایت، رابطه‌ای برای پیش‌بینی زاویهٔ خمش، که تابعی از پارامترهای مورد بررسی می‌باشد، ارائه شده است.

فرآیند خم‌کاری با لیزر

مکانیزم‌های شکل‌دهی با لیزر، براساس توزیع دمایی القا شده در اثر تابش لیزر مشخص می‌شود. توزیع دمایی در قطعه به پارامترهای فرآیند نظیر توان لیزر، قطر پرتو و غیره بستگی دارد. مکانیزم‌های فرآیند خم‌کاری با لیزر به سه صورت است: مکانیزم گرادیان دمایی، مکانیزم خمش کمانشی و مکانیزم کوتاه‌کردن [1]. در انجام آزمایش‌های تجربی و هم‌چنین شبیه‌سازی‌های عددی، پارامترهای فرآیند به گونه‌ای انتخاب شده است که مکانیزم غالب شکل‌دهی از نوع مکانیزم گرادیان دمایی می‌باشد. این مکانیزم در شکل (۲) نشان داده شده است.

مکانیزم گرادیان دمایی رایج‌ترین مکانیزم فرآیند خم‌کاری با لیزر است. در اثر حرارت‌دهی نسبتاً سریع سطح قطعه‌کار توسط پرتو لیزر و رسانایی حرارتی آرام به لایه‌های پایین، یک گرادیان دمایی بزرگ در راستای ضخامت ورق ایجاد می‌شود که انبساط حرارتی متفاوت لایه‌های ورق را به دنبال دارد. بنابراین، یک خمش منفی اتفاق می‌افتد (شکل ۲. الف) که سبب ایجاد مقادیر کوچک کرنش‌های کششی پلاستیکی در سطح حرارت دیده می‌گردد. با ادامهٔ حرارت‌دهی، در اثر افزایش درجهٔ حرارت، استحکام ناحیهٔ تحت تابش پرتو کمتر می‌شود. زمانی که تنش حرارتی به مقدار تنش سیلان ماده برسد، هر انبساط حرارتی بیشتر تبدیل به کرنش فشاری پلاستیک می‌گردد؛ زیرا که انبساط آزاد ناحیهٔ حرارت‌دیده توسط مواد اطراف آن محدود شده است. در مرحلهٔ سرمایش، ماده در لایه‌های بالایی دچار انقباض می‌شود. هم‌چنین به علت آن‌که این نواحی تحت فشار قرار داشتند، یک کوتاه‌شدگی موضعی در لایه‌های بالایی ورق و متعاقب آن، یک زاویهٔ خم دائمی به‌وجود می‌آید (شکل ۲. ب). مقدار زاویهٔ خم نهایی به چگونگی انتخاب پارامترهای فرآیند بستگی دارد [1].



شکل ۲ شمایی از مکانیزم گرادیان دمایی؛ (الف) خم منفی، (ب) خم دائمی ورق

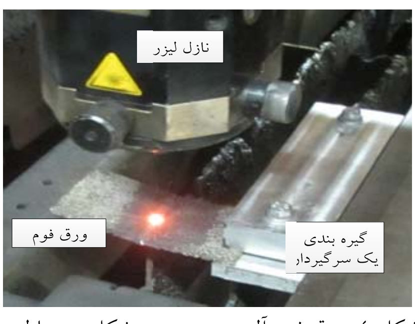
آزمایش‌های تجربی

برای انجام آزمایش‌های تجربی از دستگاه لیزر پالسی دی‌اکسیدکربن بای‌استرانیک با بیشینه توان ۳۰۰۰ وات و قطر لیزر ۵ میلی‌متر استفاده شد. هم‌چنین، ورق‌های فوم آلومینیم با استفاده از دستگاه وایرکات به ابعاد ۵۰

میلی‌متر در ۱۰۰ میلی‌متر و با ضخامت ۵ میلی‌متر تهیه گردید. اندازهٔ متوسط حفره‌های ورق فوم برابر یک میلی‌متر و چگالی متوسط ورق‌های آزمایش‌شده برابر ۰/٤ چگالی آلومینیم می‌باشد. یادآوری می‌شود که اندازهٔ متوسط حفره‌ها با استفاده از پردازش تصویر تعیین گردیده است. برای ممانعت از حرکت ورق در حین فرآیند، از یک بست به‌منظور ایجاد گیره‌بندی یک‌سرگیردار استفاده شده است. تصویر نمونه‌های برش‌شده و هم‌چنین، ورق‌های فوم حفره‌بستهٔ آلومینیم در حین انجام فرآیند شکل‌دهی با لیزر، به‌ترتیب، در شکل (٤ و ۳) نشان داده شده است. یکی از پیچیدگی‌های تابش لیزر بر ورق‌های از جنس آلومینیم کوچک‌بودن ضریب جذب آن است که امکان تشکیل گرادیان دمایی در راستای ضخامت ورق را محدود می‌کند [21]. به‌منظور افزایش ضریب جذب پرتو توسط قطعه‌کار از پوشش‌دهی توسط اسپری گرافیت استفاده شده است. پس از انجام آزمایش‌ها و شکل‌دهی ورق‌های آلومینیم، اندازه‌گیری مقدار زاویهٔ خمش نهایی ورق‌ها با استفاده از دستگاه زاویه‌سنج انیورسال با دقت ۵ دقیقه انجام شده است. نمونه‌ای از ورق‌های فوم خم‌شده با استفاده از لیزر در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۳ ورق فوم حفره‌بستهٔ آلومینیم وایرکات شده



شکل ٤ ورق فوم آلومینیم در حین شکل‌دهی با لیزر



شکل ۵ ورق فوم آلومینیم خم‌شده با استفاده از لیزر

نتایج و بحث

در انجام آزمایش‌های تجربی از طراحی آزمایش به روش ترکیب مرکزی استفاده شده است. در طی این آزمایش‌ها، با شناسایی عوامل مؤثر بر زاویهٔ خم، رابطه‌ای بین پارامترهای ورودی و متغیر پاسخ استخراج می‌گردد. در طراحی آزمایش به شیوهٔ ترکیب مرکزی، پنج سطح به‌ازای هر پارامتر ورودی شامل توان لیزر، سرعت اسکن و تعداد پاس تعریف می‌گردد. پارامترهای ذکرشده و سطوح متناظر آن در جدول (۱) آورده شده است. به این ترتیب، تعداد نقاط طراحی به شیوهٔ ترکیب مرکزی برابر با $n = 2^k + 2k + n_0 = 2^3 + 2(3) + 6 = 20$ خواهد بود. در این رابطه، n برابر تعداد آزمایش‌های لازم، k تعداد پارامترهای ورودی و n_0 برابر تعداد نقاط مرکزی است که به‌منظور ایجاد دقت کافی برابر ٦ انتخاب شده است.

ترتیب انجام بیست آزمایش به‌صورت تصادفی‌سازی شده انجام می‌شود. هدف از تصادفی‌سازی، به حداقل رساندن تأثیر کلیهٔ عوامل احتمالی بیرونی بر نتیجهٔ آزمایش است. ترتیب انجام آزمایش‌ها و نتایج به‌دست آمده از آن در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱ پارامترهای مورد بررسی و سطوح آن

پارامتر	واحد	سطح اول	سطح دوم	سطح میانی	سطح چهارم	سطح پنجم
توان	watt	90	120	150	180	210
سرعت	mm/min	1000	2000	3000	4000	5000
پاس	-	5	10	15	20	25

جدول ۲ داده‌های آزمایش صورت گرفته با اعمال ترتیب تصادفی

شماره تصادفی	شماره آزمایش	عامل اول: توان [وات]	عامل دوم: سرعت [میلی متر بر دقیقه]	عامل سوم: تعداد پاس	زاویهٔ خمش
13	1	150	3000	5	3.00
3	2	120	4000	10	1.75
12	3	150	5000	15	3.75
2	4	180	2000	10	5.75
15	5	150	3000	15	5.48
17	6	150	3000	15	4.78
16	7	150	3000	15	5.35
4	8	180	4000	10	7.25
14	9	150	3000	25	11.00
8	10	180	4000	20	11.00
1	11	120	2000	10	1.75
5	12	120	2000	20	6.00
7	13	120	4000	20	7.25
9	14	90	3000	15	1.50
20	15	150	3000	15	4.92
11	16	150	1000	15	6.25
10	17	210	3000	15	9.58
19	18	150	3000	15	5.84
6	19	180	2000	20	9.08
18	20	150	3000	15	4.15

انتخاب مدل برازش

مدل برازش به‌صورت مجموع تعداد متناهی جمله تعریف می‌شود. هر جمله عبارت از حاصل‌ضرب ضریب تأثیر عوامل ورودی در خود عوامل می‌باشد. این مدل، طبق معادلهٔ (۱) تعریف می‌شود.

$$y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_{12} AB + \ldots \qquad (1)$$

در این رابطه، β_i ضریب تأثیر عامل ورودی و $A, B, \ldots$ نیز عوامل مؤثر ورودی بر پاسخ می‌باشد. در مدل برازش، از جملات و پارامترهایی استفاده می‌شود که دارای تأثیر معنی‌دار بر پاسخ آزمایش باشد. برای انتخاب بهترین مدل، از نرم‌افزار Design Expert 7.0.0 استفاده شده است. در این مرحله، محاسبهٔ رگرسیون به‌منظور برازش تمام مدل‌های چندجمله‌ای از پارامتر خروجی انجام می‌گیرد. به‌طور کلی، بهترین مدل برازش مربوط است به

الف) چندجمله‌ای معنی‌دار (به عبارت دیگر، مقدار p-value کوچک) با بیشینهٔ درجه (جدول ۳)؛

ب) فقدان عدم برازش (یعنی مقدار Prob>F مطابق جدول (٤) بزرگ‌تر از 0.1 باشد.

ج) تطابق قابل‌قبولی بین مقدار Adjusted R-Squared و Predicted R-Squared وجود داشته باشد (یعنی مطابق جدول (۵) اختلاف این دو مقدار کمتر از 0.2 باشد).

لازم به یادآوری است که مقدار سطح اطمینان در تحقیق حاضر برابر 95% انتخاب شده است؛ این بدان معناست که مقادیر p-value کوچک‌تر از 0.05 نشان‌دهندهٔ معنی‌دار بودن مدل است [25].

جدول ۳ مجموع مربع‌های مدل‌ها

مدل	جمع مربعات	df	مربع میانگین	F Value	p-value
Mean	666.20	1	666.20	-	-
Linear	133.34	3	44.45	38.66	<0.000.1
2FI	1.83	3	0.61	0.48	0.7029
Quadratic	7.37	3	2.46	2.67	0.1042
Cubic	5.98	4	1.49	2.78	0.1266
Residual	3.22	6	0.54	-	-
Total	817.95	20	40.90	-	-

جدول ٤ بررسی عدم‌برازش مدل‌ها

مدل	جمع مربعات	df	مربع میانگین	F Value	Prob>F
Linear	16.61	11	1.51	4.22	0.0622
2FI	14.78	8	1.85	5.16	0.0437
Quadratic	7.40	5	1.48	4.13	0.0727
Cubic	1.43	1	1.43	3.99	0.1023
Pure Error	1.79	5	0.36	-	-

جدول ۵ بررسی کلی مدل‌ها

مدل	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS
Linear	1.07	0.8788	0.8560	0.7947	31.15
2FI	1.13	0.8908	0.8404	0.6623	51.24
Quadratic	0.96	0.9394	0.8849	0.5798	63.77
Cubic	0.73	0.9788	0.9328	-0.9498	298.87

میزان معنی‌داری به‌ازای افزودن جمله‌های جدید می‌باشد. هرچه مقدار این پارامتر بزرگ‌تر باشد، اضافه‌کردن این جمله‌ها و افزایش مرتبهٔ چندجمله‌ای به برازش دقیق‌تر پاسخ‌ها می‌انجامد. پارامتر p-value شاخص بهبود مدل پس از افزودن جمله‌های موردنظر است. هرچه مقدار این پارامتر کوچک‌تر باشد (حداکثر مقدار قابل‌قبول برابر 0.05 است)، نشان‌دهندهٔ بالاتر بودن میزان بهبودی مدل است. با درنظر گرفتن این شرایط، تا به این‌جا، مدل خطی بهترین مدل قابل استفاده می‌باشد.

مرحلهٔ بعد بررسی عدم برازش مدل‌ها است (جدول ٤). این بررسی میزان مناسب بودن هرکدام از مدل‌های یادشده را در برازش دقیق نتایج نشان می‌دهد. به‌عبارت دیگر، اگر مدل دارای عدم برازش معنی‌دار باشد، به‌منظور پیش‌بینی تأثیر پارامترها مناسب نمی‌باشد. در این جدول، پارامتر F-value تغییرات اختلاف مقادیر میانگین در نقاط طراحی و پاسخ‌های متناظر تخمین‌شده توسط مدل را با تغییرات آزمایش‌های صورت‌گرفته حاصل از نقاط مرکزی طراحی (خطای خالص) مقایسه می‌نماید. بر این اساس، هرچه مقدار F-value در این بررسی کوچک‌تر باشد، و مقدار Prob>F بزرگ‌تر از 0.1 باشد، عدم برازش کمتری اتفاق خواهد افتاد و پیش‌بینی مدل قابل‌اعتمادتر می‌گردد. درنتیجه، مطابق با جدول، مدل خطی برای پیش‌بینی نتایج قابل‌قبول نمی‌باشد. برای رفع این مشکل، جمله‌های مربوط به سایر مدل‌ها که واجد شرایط ذکرشده است به مدل خطی افزوده می‌شود. عدم برازش مدل حاصل در قسمت تحلیل واریانس دوباره بررسی می‌گردد.

آخرین مرحله بررسی کلی مدل‌ها است (جدول ۵). پارامتر .Std. Dev انحراف استاندارد خطای طراحی را تخمین می‌زند. هرچه مقدار این پارامتر کوچک‌تر باشد مطلوب‌تر است. پارامترهای R-Squared و Adjusted R-Squared نسبت توضیح‌پذیری تغییرات مقادیر آزمایش توسط مدل انتخابی را مشخص می‌کند. هرچه این نسبت به یک نزدیک‌تر باشد قدرت توضیح‌پذیری مدل بیشتر است. پارامتر Predicted R-Squared تغییرات سایر مقادیر که توسط مدل پیش‌بینی می‌شود را تخمین می‌زند. مشابه به دو پارامتر قبلی، نزدیک‌تر بودن این پارامتر به مقدار واحد مطلوب می‌باشد. در نهایت، Press نشان‌دهندهٔ چگونگی برازش داده‌های آزمایش است. انتخاب کوچک‌ترین مقدار Press نسبت به سایر مدل‌ها موردنظر می‌باشد [25].

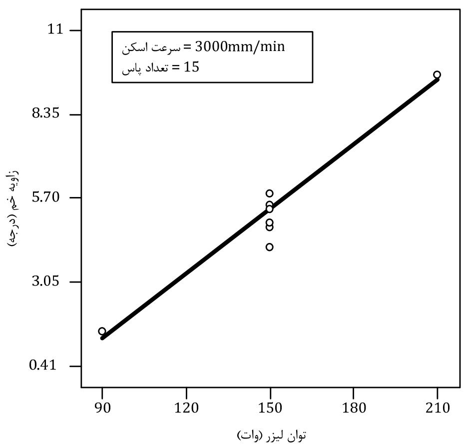
با درنظر گرفتن کلیهٔ شرایط ذکرشده، مدل چندجمله‌ای خطی به‌عنوان مدل برازش انتخاب می‌شود و به‌منظور جبران عدم برازش، جمله‌های مربع پارامترها به این مدل افزوده می‌گردد؛ به‌گونه‌ای که عدم برازش غیرمعنی‌دار حاصل گردد.

تأثیر پارامترهای فرآیند

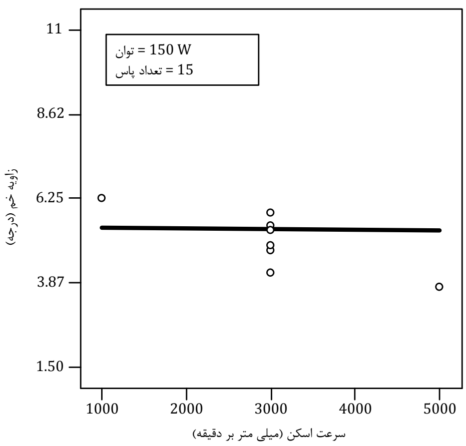
تأثیر هرکدام از پارامترهای مورد بررسی بر زاویهٔ خمش در شکل‌های (۸-٦) آورده شده است. با افزایش توان لیزر، زاویهٔ خم به‌طور قابل‌توجه افزایش می‌یابد (شکل ٦). افزایش توان لیزر به‌معنای افزایش انرژی ورودی و تأثیرگذاری بیشتر لیزر است. درواقع، هرچه توان افزایش می‌یابد، دمای لایهٔ بالایی ورق بیشتر می‌شود و گرادیان دمایی افزایش می‌یابد و در نتیجه

زاویهٔ خم بیشتر می‌گردد. تأثیر سرعت اسکن بر زاویهٔ خم در شکل (۷) آورده شده است. به‌طور کلی، سرعت بر میزان انرژی وارد در طول مسیر تأثیر می‌گذارد. در محدودهٔ بررسی‌شده عملاً تأثیر سرعت بر زاویهٔ خم ناچیز است. هم‌چنین، به‌طور طبیعی با افزایش تعداد پاس، بر زاویهٔ خم افزوده می‌شود (شکل ۸). افزایش تعداد پاس به‌معنای تکرار تابش لیزر است و افزایش مقدار شکل‌دهی را به‌همراه دارد.

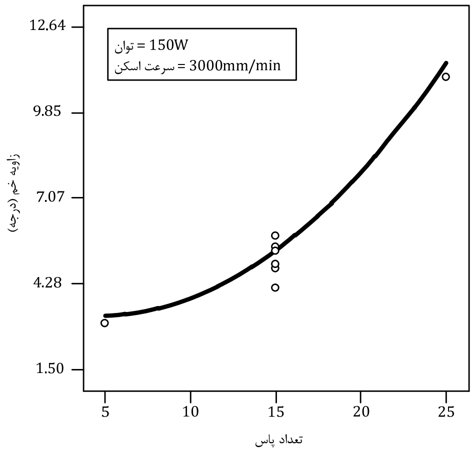
هم‌چنین نمودار تأثیر دوتایی پارامترها بر مقدار نهایی زاویهٔ خم در شکل‌های (۱۱-۹) نشان داده شده است.



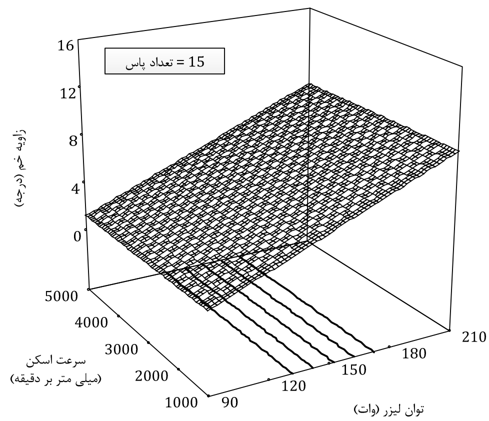
شکل ۶ تأثیر توان لیزر بر زاویهٔ خم



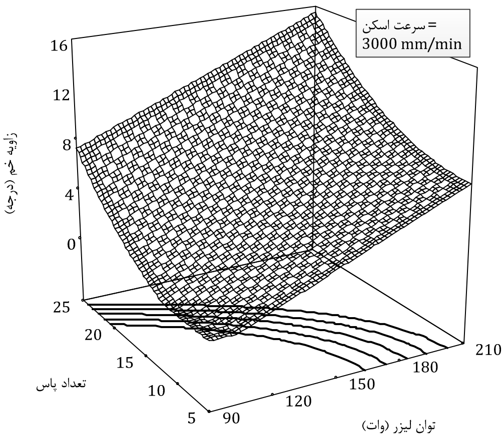
شکل ۷ تأثیر سرعت اسکن بر زاویهٔ خم



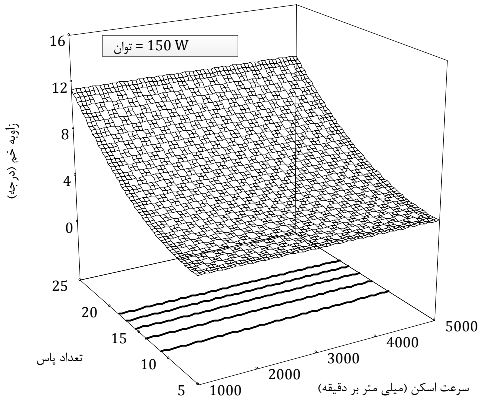
شکل ۸ تأثیر تعداد پاس اسکن بر زاویهٔ خم



شکل ۹ تأثیر توان و سرعت اسکن بر زاویهٔ خم



شکل ۱۰ تأثیر توان و تعداد پاس بر زاویهٔ خم



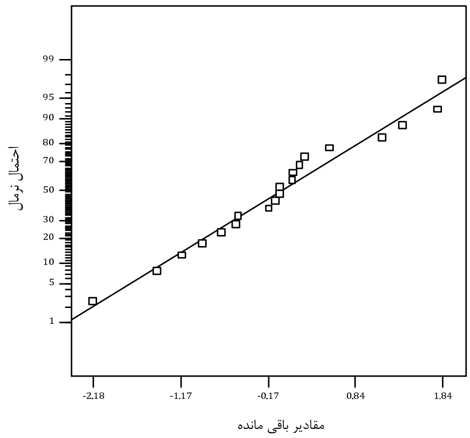
شکل ۱۱ تأثیر سرعت و تعداد پاس بر زاویهٔ خمش

تحلیل واریانس نتایج آزمایش

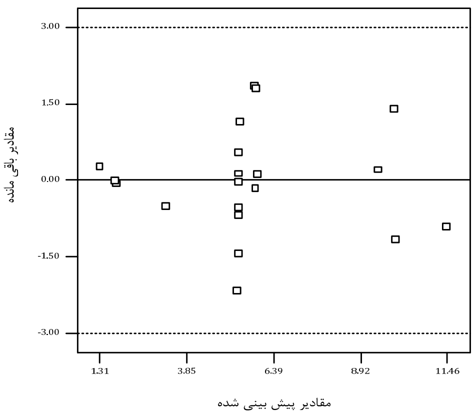
شکل‌های (۱۱-٦) بـرای نتیجـه‌گیـری قطعـی اسـتفاده نمی‌شود. به منظور تأیید اثرات نشان داده‌شـدهٔ عوامـل، از تحلیل واریانس استفاده می‌شـود. تحلیـل واریـانس، پرکاربردترین نوع تحلیل برای بررسـی اثـر متغیرهـای ورودی بر پاسخ فرآیند اسـت. ایـن تحلیـل بـا فـرض نرمال بودن توزیع خطا، ثابت بودن واریانس و استقلال آن انجام می‌شود. پیش از استفاده از این روش تحلیـل، صحت فرض‌های اشاره شده بررسی می‌گردد. بـه ایـن منظور، نمودار احتمال نرمال مقادیر باقی‌مانده در شکل (۱۲) آورده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که آیا مقادیر باقی‌مانـده (خطـا) از یـک مـدل توزیـع نرمـال پیروی می‌کند یا خیر [25]. پراکندگی نقاط آزمـایش در اطراف خط مـورب، پیـروی نتیجـهٔ طراحـی آزمـایش صورت‌گرفته از مدل توزیع نرمال را نشان می‌دهد.

نمودار مقادیر باقی‌مانده در برابر نقاط برازش‌یافتـه در شکل (۱۳) مشخص شـده اسـت. پراکنـدگی نقـاط طراحی و عدم وجود یک ساختار مـنظم در نقـاط ایـن نمودار نشان‌دهندهٔ ثابت بودن واریانس است [25].

تحلیل کامل واریانس مدل استفاده شده در جدول (٦) آورده شده است. هم‌چنان که در جـدول مشـاهده می‌شود کلیهٔ شرط‌های اشـاره‌شـده در بخـش انتخـاب مدل برازش در مدل نهایی ارضا گردیده است.



شکل ۱۲ نمودار احتمال نرمال برحسب مقادیر باقی‌مانده



شکل ۱۳ نمودار مقادیر باقی‌مانده برحسب مقادیر برازش‌شده

جدول ٦ تحلیل واریانس مدل استفاده شده

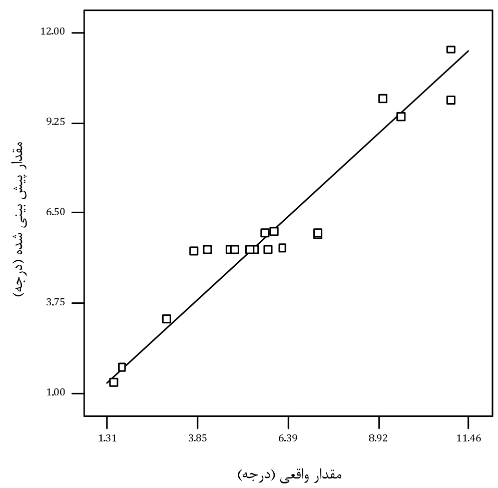
مدل	جمع مربعات	df	مربع میانگین	F Value	p-value	
Model	140.03	4	35.01	44.84	<0.0001	معنی دار
A-Power	65.98	1	65.98	84.51	<0.0001	-
B-Scan vel.	6.806E-3	1	6.806E-3	8.71E-3	0.9268	-
C-no. pass	67.36	1	67.36	86.29	<0.0001	-
C2	6.69	1	6.69	8.56	0.0104	-
Residual	11.71	15	0.78	-	-	-
Lack of Fit	9.92	10	0.99	2.77	0.1362	غیر معنی دار
Pure Error	1.79	5	0.36	-	-	-
Cor Total	151.74	19	-	-	-	-

تعیین رابطهٔ نهایی پیش‌بینی زاویهٔ خمش

اکنون که صحت مدل استفاده‌شده مورد تأیید واقع شده است، می‌توان رابطهٔ زاویهٔ خمش در ورق‌های فوم حفره‌بستهٔ آلومینیم را که توسط این مدل پیش‌بینی می‌شود قابل‌اطمینان دانست. طبق مدل استفاده شده، رابطهٔ زاویهٔ خمش مطابق رابطهٔ (۲) تعریف می‌گردد.

$$\begin{aligned}\text{Bending angle} &= -6.4097\\ &+0.0676\times P-2.0625E-005\times v\\ &-0.1846\times n+0.0198\times n^2\end{aligned} \qquad (2)$$

در رابطهٔ فوق، P برابر توان لیزر برحسب وات، v برابر سرعت اسکن پرتو برحسب میلی‌متر بر دقیقه و n تعداد پاس‌های اسکن است.



شکل ۱٤ نمودار مقادیر زاویهٔ خمش پیش‌بینی‌شده برحسب مقادیر واقعی

نمودار مربوط به مقادیر واقعی زاویهٔ خمش در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطهٔ (۲) در شکل (۱٤) آورده شده است. پراکندگی نقاط آزمایش در اطراف خط مورب ٤۵ درجه نشان‌دهندهٔ پیش‌بینی مناسب مدل حاصل است [25].

نتیجه‌گیری

در این مقاله، فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فوم حفره‌بستهٔ آلومینیم با استفاده از لیزر انجام گرفته است. باتوجه به استحکام پایین کششی این دسته از ورق‌ها عملاً امکان شکل‌دهی آن‌ها با استفاده از روش‌های رایج مکانیکی وجود ندارد. فرآیند شکل‌دهی با لیزر به‌عنوان یک روش شکل‌دهی حرارتی امکان خم ورق‌های فوم فلزی را فراهم آورده است. آن‌چه بر میزان شکل‌دهی نهایی با استفاده از این روش می‌انجامد تعیین دقیق پارامترهای مؤثر می‌باشد. به این‌ترتیب، سه پارامتر فرآیندی که مربوط به پرتو لیزر است شامل توان لیزر، سرعت اسکن پرتو و تعداد پاس‌های اسکن موردنظر قرار گرفت و تأثیر آن روی مقدار نهایی زاویهٔ خم تعیین گردید. هم‌چنین رابطه‌ای برای پیش‌بینی زاویهٔ خمش ورق‌های فوم حفره‌بستهٔ آلومینیم ارائه شده است. به‌طور کلی، افزایش توان لیزر به‌علت افزایش انرژی ورودی به افزایش زاویهٔ خم می‌انجامد. افزایش تعداد پاس نیز به افزایش زاویهٔ خم منجر می‌شود. هرچند، با شیب بسیار کم، بین سرعت اسکن و زاویهٔ خم رابطهٔ معکوس برقرار است. تأثیر پارامترهای فرآیندی مورداشاره بر زاویهٔ خمش به‌طور خلاصه عبارت است از:

۱. با افزایش توان لیزر از ۹۰ وات به ۲۱۰ وات، با فرض ثابت ماندن سایر پارامترها، زاویهٔ خمش از مقدار ۱.۳۱ درجه به ۹.٤۳ درجه افزایش یافته است.

۲. افزایش سرعت اسکن از ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه به ۵۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه باعث کاهش ملایم زاویهٔ خمش از ۵.٤۱ درجه به ۵.۳۳ درجه می‌شود.

۳. افزایش تعداد پاس لیزر از ۵ به ۲۵، زاویهٔ خمش را ۳.۲۵ درجه به ۱۱.٤٦ درجه افزایش می‌دهد.

مراجع

1. Zhang, X., "Laser-assisted High Precision Bending and its Applications", Mechanical Engineering; Industrial Engineering Board, Dissertation/Thesis No. 3154677, Indiana, (2004).
2. Geiger, M. and Vollertsen, F., "The Mechanisms of Laser Forming", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 42, 301-304, (1993).
3. Shichun, W. and Jinsong, Z., "An experimental study of laser bending for sheet metals", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 110, pp. 160-163, (2001).
4. Guan, Y., Sun, S., Zhao, G. and Luan, Y., "Influence of material properties on the laser-forming process of sheet metals", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 167, pp. 124-131, (2005).
5. Che Jamil, M.S., Sheikh, M.A. and Li, L., "A study of the effect of laser beam geometries on laser bending of sheet metal by buckling mechanism", Optics & Laser Technology, Vol. 43, pp. 183-193, (2011).
6. Edwardson, S.P., Abed, E., Bartkowiak, K., Dearden, G. and Watkins, K.G., "Geometrical influences on multi-pass laser forming", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 39, pp. 382, (2006).
7. Cheng, J. and Lawrence Yao, Y., "Cooling Effects in Multiscan Laser Forming", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 3, pp. 60-72, (2001).
8. Cheng, P., Fan, Y., Zhang, J., Yao, Y.L., Mika, D.P., Zhang, W., Graham, M., Marte, J. and Jones, M., "Laser Forming of Varying Thickness Plate—Part I: Process Analysis", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 128, pp. 634-641, (2005).
9. Hoseinpour Gollo, M., Mahdavian, S.M. and Moslemi Naeini, H., "Statistical analysis of parameter effects on bending angle in laser forming process by pulsed Nd:YAG laser", Optics & Laser Technology, Vol. 43, pp. 475-482, (2011).
10. Shen, H. and Yao, Z., "Study on mechanical properties after laser forming", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 47, pp. 111-117, (2009).
11. Wu, D., Zhang, Q., Ma, G., Guo, Y. and Guo, D., "Laser bending of brittle materials", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 48, pp. 405-410, (2010).
12. Shi, Y., Liu, Y., Yi, P. and Hu, J., "Effect of different heating methods on deformation of metal plate under upsetting mechanism in laser forming", Optics & Laser Technology, Vol. 44, pp. 486-491, (2012).
13. Guan, Y., Zhang, H., Liu, J. and Sun, S., "Laser micro-bending process based on the characteristic of the laser polarization", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, pp. 662-671, (2012).
14. Ghadiri Zahrani, E. and Marasi, A., "Experimental investigation of edge effect and longitudinal distortion in laser bending process", Optics & Laser Technology, Vol. 45, pp. 301-307, (2013).
15. Maji, K., Pratihar, D.K. and Nath, A.K., "Experimental investigations and statistical analysis of pulsed laser bending of AISI 304 stainless steel sheet", Optics & Laser Technology, Vol. 49, pp. 18-27, (2013).
16. Safari, M. and Farzin, M., "Experimental and numerical investigation of laser bending of tailor machined blanks", Optics & Laser Technology, Vol. 48, pp. 513-522, (2013).
17. Merklein, M., Hennige, T. and Geiger, M., "Laser forming of aluminium and aluminium alloys — microstructural investigation", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 115, pp. 159-165, (2001).
18. Labeas, G.N., "Development of a local three-dimensional numerical simulation model for the laser forming process of aluminium components", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 207, pp. 248-257, (2008).

19. Qin, Y., Chen, Y., Ni, X., Shen, Z., Bi, J. and Zhang X., "Axisymmetric numerical simulation of plastic damage in aluminum alloy induced by long pulsed laser", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 48, pp. 361-367, (2010).
20. Knupfer, S.M. and Moore, A.J., "The effects of laser forming on the mechanical and metallurgical properties of low carbon steel and aluminium alloy samples", Materials Science and Engineering: A, Vol. 527, pp. 4347-4359, (2010).
21. Roohi, A.H., Gollo, M.H. and Naeini, H.M., "External force-assisted laser forming process for gaining high bending angles", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 14, pp. 269-276, (2012).
22. Banhart, J. "Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foam", Progress in Materials Science, Vol. 46, pp. 559-632, (2001).
23. Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W. and Wadley, H.N.G, "Metal Foams: A Design Guide", Woburn: Butterworth-Heinemann publication. Inc., Woburn, pp. 1-5, (2000).
24. Quadrini, F., Guglielmotti, A., Squeo, E.A. and Tagliaferri, V., "Laser Forming of Open-cell Aluminium Foams, Journal of Materials Processing Technology", Vol. 210, pp. 1517-1522, (2010).
25. Design Expert. Software 7.0.0, Stat-Ease, Inc. 2005, Help Section.